

in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources. 2007. Vol. 2 (038). P. 1-15.

3. Kangas A., Kangas J., Kurtilla M. Decision support for forest management. Springer, 2007. 237 p.

4. Saaty T.L. Theory and Applications of the Network Process. Pittsburgh: RWS Publication, 2005. 352 p.

5. Rockström J., Karlberg L. Quadruple Squeeze: Defining the safe operating space for freshwater use to achieve a triply green revolution in the Anthropocene // *Ambio*. 2010. 39(3). P. 257-265.

---

УДК 630\*182+581.524.3

**Н.С. Иванова**

(N.S. Ivanova)

Ботанический сад УрО РАН, Екатеринбург

(Botanic garden of the Ural branch of the Russian Academy of Sciences,  
Ekaterinburg)

## **ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ РАЗВИТИЯ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ (FOREST ECOSYSTEM DEVELOPMENT STABILITY EVALUTION)**

Истощение природных ресурсов неоднократно вызывало региональные кризисы, влияя на экономическое благополучие. В связи с этим объективная оценка устойчивости экологических систем – центральная проблема в рамках концепции устойчивого развития регионов. Несмотря на множество публикаций по этой теме, проблема оценки устойчивости природных систем по-прежнему остро актуальна.

Цель нашей работы – разработка на основе теоретических положений генетической типологии Б.П. Колесникова и теории катастроф Р. Тома междисциплинарного подхода для оценки устойчивости восстановительно-возрастной динамики лесной растительности после сплошных рубок.

Исследования проводились в южно-таежном округе Зауральской холмисто-предгорной провинции [1] между 57°00'–57°05' с.ш. и 60°15'–60°25' в.д. К настоящему времени, несмотря на сильную нарушенность растительности в районе исследований, найдены участки старовозрастных (140–200-летних) условно-коренных лесов во всех основных типах лесораститель-

ных условий [1], в них заложены пробные площади. В широком градиенте условий изучено формирование лесной растительности на сплошных вырубках [2]. Для двух типов леса изучена восстановительно-возрастная динамика от сплошных вырубок (4–5-лет) до древостоев 50–55-летнего возраста [3]. В рамках теории катастроф предложена модель формирования древесного яруса на сплошных вырубках в зависимости от двух управляющих параметров [4], которая формализуется следующим дифференциальным уравнением:

$$\frac{d\rho}{dt} = -|k_1|\rho + |k_2|T\rho^2 - |k_3|\rho^3 + |k_4|H, \quad (1)$$

где  $k_i$  – некоторые параметры экосистемы, которые следует определить. Управляющий параметр  $H$  – характеристика богатства лесорастительных условий (мощность почвы, см). Управляющий параметр  $T$  – безразмерная характеристика интенсивности развития травянистого яруса:  $T = (p_0 - p_m)/p_0$ ;  $p_m$  – масса трав (чем больше масса трав, тем меньше  $T$ );  $p_0 = (p_s + p_e)/2$  – среднее значение плотности сосны и березы;  $p_s, p_e$  – плотность сосны и березы соответственно.

Предлагаемая модель описывает угнетение формирующейся древесной растительности травянистым ярусом и влияние лесорастительных условий на темпы роста древесных растений и справедлива только при достаточном обсеменении вырубок. Чем меньше  $T$ , тем сильнее древесная растительность угнетается травами. Влияние управляющих параметров на направление восстановительных смен подробно рассмотрено ранее [2].

На основе полученных нами данных, решая обратную задачу, определили все параметры уравнения (1) [3]. От уравнения (1) сделан переход к уравнению (2) и далее к уравнению (3) [4]:

$$\frac{d\eta}{dt} = -(\eta^3 + a^*\eta + b^*), \text{ или } \frac{d\eta}{dt} = -\frac{\partial F^*}{\partial \eta}, \quad (2)$$

$$F^*(\eta, a^*, b^*) = \frac{1}{4}\eta^4 + \frac{1}{2}a^*\eta^2 + b^*\eta, \quad \eta = \rho^* - T\rho_0^*. \quad (3)$$

Здесь  $\eta = p_0/p_c - Tp_0/p_c$  – параметр порядка, характеризующий отклонение плотности растительности (древесной и травянистой) при фиксированной величине  $T$ , близкой к единице, от некоторого среднего значения плотности сосны и березы  $p_0 = (p_s + p_e)/2$ ;  $\rho_0^* = |k_2|/3|k_3|\rho_c$ ;  $\rho_c$  – масштаб плотности;  $a^*, b^*$  – параметры:  $a^* = -3(T^2\rho_0^* - 1)$ ,  $b^* = -H^* + 3Tp_0^* - 2T^3\rho_0^{*3}$ . Параметр  $b^* = -H^* + H_s^*$  можно представить как сумму внешнего поля  $H^*$  и собственного самосогласованного  $H_s^* = 3Tp_0^* - 2T^3\rho_0^{*3}$ .  $H^* = H/H_c$ ,  $H_c$  – критическая мощность почв. При  $b^* = 0$ ,  $H^* = H_s$ .  $F^* = F/F_0$  – потенциальная функция катастрофы сборки, которая определяет энергетическую характеристику в приведенном виде.

Модель позволяет количественно оценить устойчивость развития (вероятность смены эдификатора). Устойчивость состояния системы опреде-

ляется по виду потенциальной функции, наличие локального или глобального минимума – с помощью теоремы Тома: для катастрофы сборки – ненулевыми значениями управляющего параметра  $b^*$  (при  $b^*=0$  потенциал симметричный). Для рассмотренных нами частных ситуаций  $b^*$  отличен от 0: для сосняков брусничниковых  $b^*=5,13 \cdot 10^6$ ; для производных березняков разнотравно-вейниковых  $b^*=4,12$ . Разница между рассматриваемыми сосняками и березняками по параметру  $b^*$  составляет 6 порядков.

Об устойчивости формирования структуры древесного яруса можно судить по удаленности системы от сепаратрисы. Сепаратриса  $(a^*/3)^3 + (b^*/2)^2 = 0$  является предельной для метастабильных состояний. Для изученных нами сосняков брусничниковых  $(a^*/3)^3 + (b^*/2)^2 = -7,79 \cdot 10^{13}$ , для березняков разнотравных  $(a^*/3)^3 + (b^*/2)^2 = -79,59$ . Эти значения показывают достаточную удаленность от сепаратрисы и сосняков брусничниковых, и березняков разнотравно-вейниковых, следовательно, смена эдификатора маловероятна. Чем больше удаленность от сепаратрисы, тем большие внешние воздействия необходимы для изменения структуры древесного яруса. В нижних частях пологих склонов с мощными дренированными почвами происходит нежелательная смена условно-коренных сосняков разнотравных на малоценные длительно-производные березняки разнотравно-вейниковые, в которых восстановление преобладания сосны естественным путем затруднено. Для восстановления исходных сосновых лесов необходимы лесохозяйственные мероприятия.

Предлагаемый нами подход позволяет рассчитать восприимчивость для уравнения  $\eta^3 + a^* \eta + H_s^* = H^*$ : характеристику изменения переменной  $\eta$  при изменении внешнего поля  $H^*$ :

$$\chi = \frac{\partial \eta}{\partial H^*} = \frac{1}{3\eta^2 + a^*} = -\frac{1}{2a^*} = \frac{1}{6(T^2 \rho_0^{*2} - 1)}.$$

При приближении к критической точке  $a^* = b^* = \eta \rightarrow 0$ , а восприимчивость стремится к бесконечности. Для рассматриваемых нами сосняков брусничниковых восприимчивость составляет 0.0000038, для березняков разнотравно-вейниковых – 0.038. Малая восприимчивость и достаточная удаленность от сепаратрисы сосняков брусничниковых свидетельствует об устойчивости естественного формирования исходных лесов, в случае березняков разнотравно-вейниковых – об устойчивости формирования малоценных производных мелколиственных.

Таким образом, на основе синтеза генетической лесной типологии и синергетики (нелинейной динамики) нами предложен принципиально новый комбинированный подход, который обеспечивает объективную оценку устойчивости природных экосистем и обоснованное прогнозирование их состояния. Он позволяет выявить кризисные ситуации в развитии лесов и своевременно проводить необходимые природолесоохранные мероприятия.

Автор выражает глубокую благодарность д-ру физ.-мат. наук, проф. Г.П. Быстраю и аспиранту С.А. Охотникову за предоставленный программный продукт и помощь в моделировании.

Работа выполнена при частичной поддержке Программы Президиума РАН «Биологическое разнообразие» (проект 09-П-4-1039).

### *Библиографический список*

1. Колесников Б.П., Зубарева Р.С., Смолоногов Е.П. Лесорастительные условия и типы лесов Свердловской области. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1974. 176 с.

2. Иванова Н.С., Быстрай Г.П. Модель формирования структуры древесного яруса на вырубках. Часть 1. Управляющие параметры // Аграрн. вестник Урала. 2010. № 5. С. 85–89.

3. Иванова Н.С. и др. Прогнозирование сукцессионной динамики в целях сохранения биоразнообразия лесных экосистем и оптимизации экономических затрат на лесовосстановление / Н.С. Иванова, Г.П. Быстрай, С.А. Охотников, М.В. Ермакова // Принципы и способы сохранения биоразнообразия: матер. IV всерос. науч. конф. с междунар. участием / Мар. гос. ун-т. Йошкар-Ола, 2010. С. 277–280.

4. Быстрай Г.П., Иванова Н.С. Подходы к моделированию динамики лесной растительности на основе теории катастроф // Аграрн. вестник Урала. 2010. № 2 (68). С. 75–79.



УДК 330

**С.П. Калашникова**  
(S.P. Kalashnikova)

ПАГС им. П.А.Столыпина, Саратов  
(Volga region academy for civil service of P.A.Stolypin, Saratov)

## **МЕТОДЫ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ СРЕДОФОРМИРУЮЩИХ ФУНКЦИЙ ПОЧВ (METHODS OF ECOLOGICAL AND ECONOMIC EVALUATION OF THE FUNCTIONS OF SOIL SREDOFORMIRUYUSCHIH)**

В настоящее время уже произошло осознание качества среды обитания. Но тем не менее традиционно особо охраняемые природные терри-